

四川芦山 7.0 级地震卫星热红外异常解析^①

张 璇¹, 张元生^{1,2}, 魏从信^{1,2}, 田秀丰¹, 汤 倩¹, 高 见¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:以中国静止气象卫星 FY-2C/E 亮温资料为数据源, 采用功率谱相对变化法对 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 级地震进行震例数据处理和分析。结果显示:震前热异常具有明显时空特征, 2013 年 3 月底震中及其北部区域出现热红外异常, 异常区范围随时间逐渐扩大、幅度陡增; 4 月 13 日左右异常面积达到最大, 随后缓慢收缩, 异常持续时间近一个月, 异常幅度最大值达到 9 倍多, 最大值后 3 天发震。该次地震热红外异常特征显著, 易于识别, 进一步验证了卫星热红外异常在地震预判方面的作用。

关键词:四川芦山 7.0 级地震; 静止卫星; 热红外遥感; 相对功率谱; 亮温变化

中图分类号: P315.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)02-0272-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0272

Analysis of Thermal Infrared Anomaly before the Lushan M_s 7.0 Earthquake

ZHANG Xuan¹, ZHANG Yuan-sheng^{1,2}, WEI Cong-xin^{1,2},
TIAN Xiu-feng¹, TANG Qian¹, GAO Jian¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Aiming at analyzing the thermal infrared anomaly that occurred before the M_s 7.0 earthquake in Lushan, Sichuan, remotely sensed infrared brightness temperature data from China Geostationary Meteorological satellite FY-2C/E was collected, and the infrared data from the prime period from 1:00 to 5:00 Peking time was selected as the data source. By processing the data to eliminate cloud cover and by using the power spectrum transform method, we analyzed the thermal infrared anomalies in the earthquake temporal evolution diagram and the timing curve of the average brightness temperature. The results showed that a month before the earthquake, a small area of thermal anomaly existed just north of the epicenter, and this area showed irregular shapes. With the passage of time, the abnormal range gradually expanded along a certain direction in the tectonic stress field. From April 4, the abnormal area expanded along the northeasterly direction and reached its maximum on April 13, 2013. At the same time, a small-scale anomaly was discovered just south of the epicenter, with the epicenter always being at the edge of the abnormal parts. The earthquake cycle related to these thermal anomalies was 64 days, and the thermal anomalies lasted more than 30 days. Before the earthquake, the magnitude of the relative

① 收稿日期: 2013-05-03; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013028

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所青年基金(2011Q04); 国家科技支撑计划课题(2012BAK19B04); 兰州地球物理国家野外科学观测研究站开放基金(2013Y04)

作者简介: 张 璇(1985-), 女(汉族), 甘肃天水人, 在读硕士研究生, 主要从事地震卫星应用研究。E-mail: zhangx198565@126.com

通讯作者: 张元生(1965-), 男(汉族), 贵州湄潭人, 研究员, 主要从事卫星遥感应用与地震学方面的研究工作。

change was greater than 9 times, the greatest in the past two years. From the end of March to the seismogenic day, the average increased sharply, with the abnormalities peaking 3 days before the earthquake, which is similar to the Wenchuan earthquake of May 12, 2008. We simultaneously found that the brightness temperature anomaly was distributed consistently along the fault, which should be related to the distribution of active tectonics. The thermal infrared anomalies before the earthquake were fairly obvious and persistent over time, and went through two stages, initial warming and strengthening warming. The abnormal area moved and expanded rapidly along the fault direction. The epicenter of this earthquake was not in the area of maximum abnormality but approached the fault that was near the edge of the anomaly. This situation was consistent with the results of most earthquake cases, and it may be related to the geological structure and the underground environment of the epicenter. These characteristics can provide some clues to determine future seismogenic times and to track the location of epicenters. This study addressed the characteristics associated with the evolution of thermal infrared anomalies and earthquake preparation, and elaborated a new understanding of the relationship between thermal anomalies and the elements of earthquakes. Because this current understanding of the genetic mechanism of thermal infrared anomalies for earthquakes is not yet mature, future work will look at the shock cases and summarize the laws.

Key words: Lushan $M_s7.0$ earthquake in Sichuan province; Geostationary meteorological satellite; Infrared remote sensing; Relative power spectrum; Brightness temperature change

0 引言

2013 年 4 月 20 日四川省雅安市芦山县发生 $M_s7.0$ 地震,继汶川地震后再次给四川造成大量的人员伤亡和经济损失。两次地震震中相距仅 85 km,同属于龙门山断裂带且破裂方式相似。

大量卫星遥感资料地震分析结果发现,强震前存在不同程度的“热震兆”现象^[1-13]。强祖基等对 1996 年 2 月 3 日云南丽江地震和 1998 年 4 月 14 日唐山地震前的卫星热红外亮温增温演化特征详细分析发现两次地震分别在震前 52 天和 25 天出现增温异常^[14]。马瑾等在研究 1997 年玛尼 7.9 级地震前后震中区地温图像的动态演化过程中发现,震前 20 天阿尔金断裂东段出现明显增温现象,随后逐渐扩展并呈明显条带状分布^[15]。郭卫英等利用 NOAA 卫星热红外遥感图像对新疆塔里木盆地进行研究,对比分析发现塔里木盆地周边的 2 次中强震前一个月均有不同程度的红外增温现象^[16]。地震热信息属强干扰下的弱信号,受区域地质环境和大气环境等的影响较大。张元生等采用不同于以往的方法,应用小波变换和相对功率谱估计分析静止卫星热红外遥感资料研究汶川等地震,发现地震发生前存在明显的热异常特征周期和特征幅值^[17]。本文应用这些方法对静止气象卫星热红外亮温数据进行处理,提取芦山地震前热异常信息,并结合震中区构造

活动研究异常随时间变化的分布特征、持续时间及异常区特征功率谱幅值。

1 热红外亮温数据和处理方法

亮温是卫星上搭载的辐射计实际观测到的某个辐射值,利用普朗克辐射公式和波段响应函数转化为黑体的辐射温度值,单位为 K,有别于物体的真实辐射温度。热辐射强度主要依赖物体的温度、比辐射率和辐射物体的表面状况。本文所使用的研究数据是静止气象卫星 FY-2C/E 的红外遥感亮温产品数据。FY-2C 和 FY-2E 分别发射于 2004 年 10 月 19 日和 2008 年 6 月 15 日,定点于东经 105° ,星下点分辨率为 5 km,有效观测范围为 $60^\circ\text{N}\sim 60^\circ\text{S}$, $45^\circ\text{E}\sim 165^\circ\text{E}$,每 30 分钟或 1 个小时对地球约三分之一面积观测一次,其观测精度高于极轨卫星,并且具有地点的可比性和时间的一致性,用于地震异常研究更具优势。

我们使用的资料区域范围为 $5^\circ\sim 50^\circ\text{N}$, $55^\circ\sim 150^\circ\text{E}$,这样可覆盖整个中国及周边大范围区域;选取研究时间长度为 2011 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日。为了减少太阳影响,选择每天 01:00 时至 05:00 时 (GMT17:00 时至 21:00 时)的 5 个时次的观测数据,用补窗法(对每天 5 个时次的观测数据,按照观测质量,考虑云干扰值为下限、错值及不

符合黑体辐射公式的高值为上限进行剔除,所得数据计算均值)进行简单处理,得到已去除部分云影响的亮温日值。

本研究采用小波变换和相对傅氏功率谱法对选取的震前亮温数据进行处理。首先去除亮温数据中的地球基本温度场、年变温度场和短时间变化温度场,即对每个像元用其 2 阶小波尺度部分减 7 阶尺度部分,相当于进行带通滤波,舍去了高频和低频信息,由此得到在时间域正负相间的亮温相对变化波形数据。由于上述获得的红外数据量较大,不易进行全时空分析,我们采用功率谱法获得各像元时频特性的功率谱数据,目的在于研究地震前后热辐射变化的功率谱与其他时段的功率谱有何异同。以 $n = 64$ 天为窗长、 $m = 1$ 天为滑动窗长做傅氏变换,计算其功率谱。对每个像元的时程数据滑动一次可获

得一组功率谱,时间约定为窗内数据的起始时间,这样就获得了时频空间数据。其次,为了更好地反映地震前后的功率谱变化,对每一像元的所有功率谱做相对处理。最后,进行全时空和全频段扫描,提取识别异常区域,从而进一步判断和分析可能的发震区域及异常变化特征^[17-19]。

2 资料处理结果

2.1 地震热红外异常演化过程及特征

2013年4月20日芦山 $M_s 7.0$ 地震属逆冲型地震,震中位于北纬 30.3° ,东经 103.0° ,发震构造处于龙门山断裂南段,这一带地质构造复杂,曾发生多次地震。我们设定扫描分析地理范围为 $29^\circ N \sim 35^\circ N, 99^\circ E \sim 105^\circ E$,通过相对功率谱时空演化图可以明显识别震前热红外异常,主要集中在震中以北。

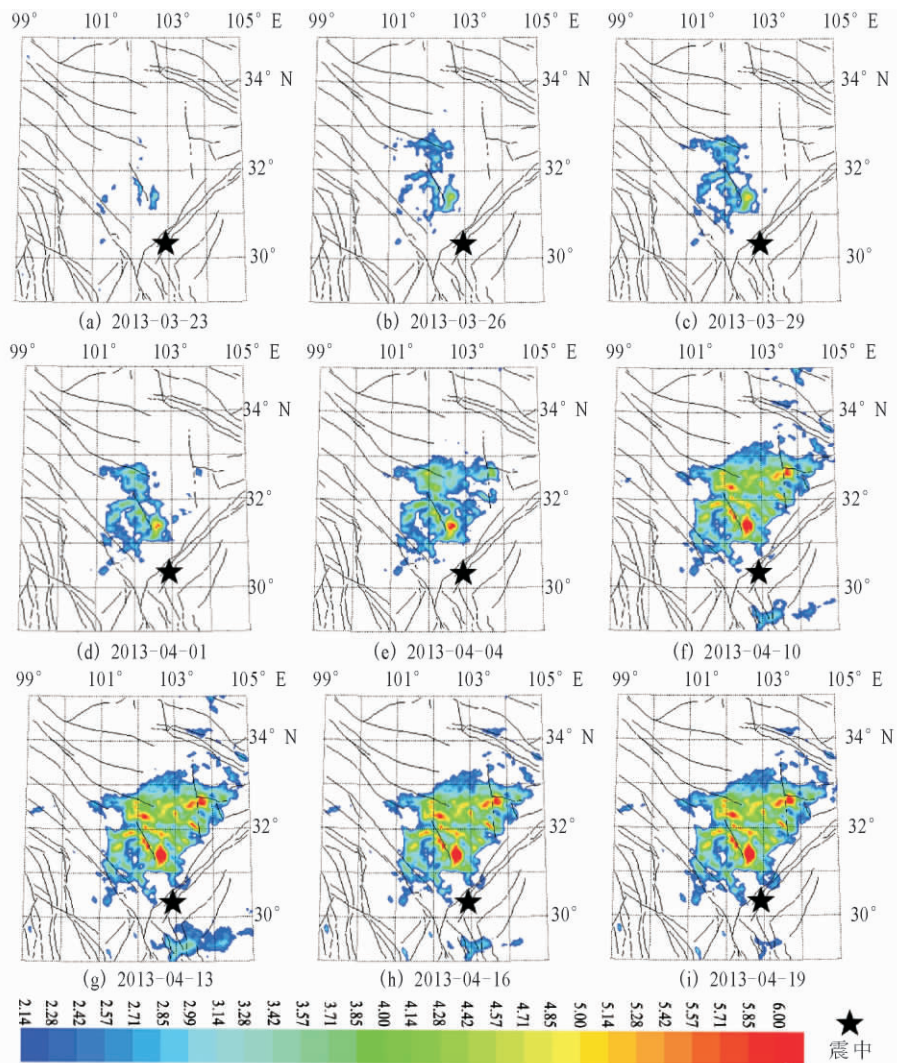


图 1 芦山 7.0 级地震前热红外相对功率谱时空演化图

Fig. 1 Time evolution maps of thermal infrared anomalies before Lushan $M_s 7.0$ earthquake.

演化趋势如下(图 1):地震前一个月左右开始出现热红外异常,3月26日起可明显看出震中以北区域开始出现小面积热异常(图 1 中绿色区域),异常范围随着时间推移由西向东逐渐扩大,在震源区北部形成不规则的形状;4月4日起异常区域渐趋于 NE 向延伸,直至 4 月 13 日左右异常面积达到最大,同时在震中区的南部出现小范围热异常,震中位置始终位于异常边缘部位,异常总体方向与断层分布基本一致,或与该地区构造应力的变化相关;震前 4 天左右异常面积开始缓慢收缩。通过此次震例分析并结合历史震例发现,异常的演化过程及方向能为追踪地震可能发生的区域范围提供一些线索,即震中通常位于异常最集中区域的边缘部位、两组热异常条带交汇部位或孤立异常区域的凹陷部位。

2.2 地震热红外区域亮温平均值时间变化特征

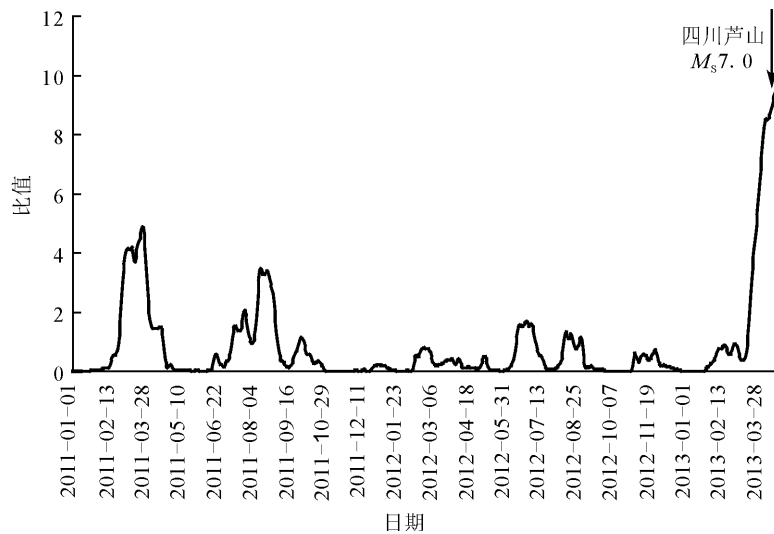


图 2 异常区平均谱值时序曲线(区域范围:31.4°~31.5°N,102.6°~102.7°E)

Fig. 2 Time-series curves of infrared effective observation period in this area. (Region: 31.4°~31.5°N,102.6°~102.7°E)

3 结论与讨论

3.1 结论

芦山 7.0 级地震前出现了较明显的热红外亮温异常变化。从地震前热红外相对功率谱时空演化图中可以发现,震前约 30 天异常开始明显,异常范围的变化由初步显现到加速发展,是一个不断骤增的过程。演化过程中异常相对集中且展布方向与断层走向基本一致,应与该地区构造应力场的调整变化和地下环境相关,同时也说明热异常变化可能与断裂活动有关。对 2011 年 1 月 1 日至 2013 年 4 月 30 日期间异常区平均谱相对值时序曲线的分析表明,异常区特征功率谱幅值最高达到平均值的 9 倍以上。而该次地震特征周期相对较长,或与该地区震

异常区的平均谱值时间序列可反映异常区域热红外亮温的总体变化情况,是分析判断热异常变化的有效方法。分析该区域两年多数据的平均值亮温变化可以得到以下特征(图 2):(1)该次地震引起的热异常特征周期约为 64 天,震前特征功率谱幅值为两年多数据的最大值,相对变化率达到 9 倍以上;(2)地震前特征功率谱幅值大于 2 倍的持续时间在 30 天左右;(3)2013 年 3 月底至发震日(2013 年 4 月 20 日),平均谱值陡增,并于 4 月 17 日达到峰值;(4)该次地震发生于特征幅值最大值后的第 3 天,与 2008 年 5 月 12 日汶川地震情况相似。研究发现,各地震发震时刻与异常峰值的时间间隔不尽相同^[12],应为经纬度、地质和大气环境等因素影响所致。

前气候干旱、大气中水汽含量较低及当地的特殊地质环境有关。由于影响热红外变化的因素较多,该手段始终未能形成一种易于识别且成熟可靠的异常提取指标,但本次地震热异常的突出反映进一步验证了卫星热红外异常在地震判识方面的作用。

3.2 讨论

本次地震热异常幅度相比以往震例表现的相对较小,根据对 2012 年 7 月下旬至 2012 年 9 月中旬数据的全时空和全频段扫描发现,川滇地区(21°N~33°N,98°E~110°E)出现长时间大面积热红外异常区^[13](图 3),我们在 2012 年 9 月 4 日向有关预报部门提供了相关图件及预测意见。2012 年 9 月 7 日云南彝良相继发生 M_s 5.7 和 M_s 5.6 地震,该系列

地震对区域应力集中趋势可能有一定的缓解。结合图1和图3的异常分布发现,两次异常分布特征可能解释地震孕育与构造的关系,2012年9月异常区域分布在龙门山断裂带东南(四川盆地),2013年4月异常区域分布在龙门山断裂带西北。从中期尺度(半年时间)演化来看,芦山7级强震发生于两次异常过渡的交汇区,该区域位于龙门山断裂带南部。类似现象发生在云南盈江 $M_S5.8$ 地震和缅甸 $M_S7.2$ 地震热红外异常演化过程中^[18]。综上所述我们可以做如下探讨:(1)一次大面积长时段的异常可能对应多次相近区域的地震,这与该地域应力变化和能量释放的方向性有关。(2)多次相近区域且间隔较长时间的异常可能对应一次大地震,这与区域活动构造和应力积累转化有关。因此,地震热红外异常具有中长期和短临相结合、异常与构造相关联、异常演化与地震孕育相联系的综合特征。这些新认识对热异常与地震三要素的关系判定起到很好的启示作用,或许能够提高未来热异常预测指标的精准度。

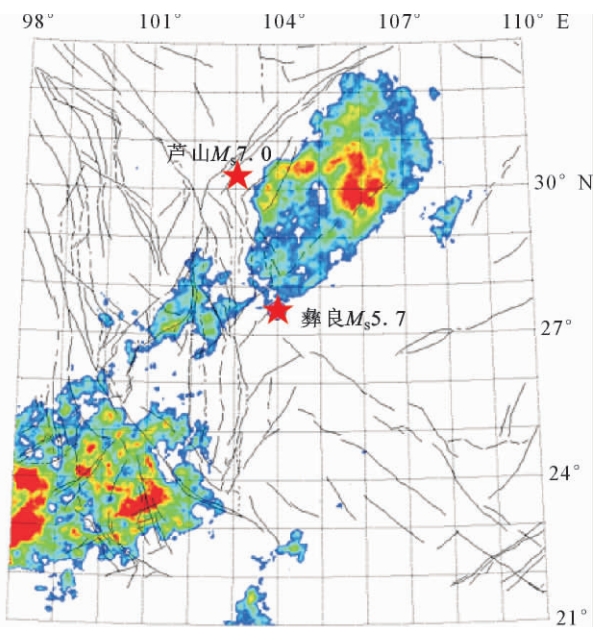


图3 2012年9月1日彝良地震震前热红外异常分布图

Fig. 3 The thermal infrared anomalies area before Yiliang earthquake.

致谢:感谢中国气象局国家卫星气象中心提供了部分静止卫星数据资料,感谢荣代璐研究员及评审专家提出的宝贵意见。

[参考文献]

[1] 刘德福,彭克银,刘维贺,等.地震有“热征兆”[J].地震学报,1999,12(6):710-715.

- Liu D F, Peng K Y, Liu W H, et al. Thermal Omens before Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 12(6): 710-715.
- [2] Saraf A K, Rawat P, et al. Satellite Detection of Earthquake Thermal Infrared Precursors in Iran[J]. Nature Hazard, 2008, 47: 119-135.
- [3] 张元生,沈文荣,徐辉.新青8.1级地震前卫星热红外异常[J].西北地震学报,2002,24(1):1-4.
Zhang Y S, Shen W R, Xu H. Satellite Thermal Infrared Anomaly before the Xinjiang - Qinghai Border $M_S8.1$ Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2002, 24(1): 1-4.
- [4] 钟美娇,张元生.2005年10月8日巴基斯坦7.8级地震热红外异常[J].西北地震学报,2007,29(2):137-140.
Zhong M J, Zhang Y S. Satellite Infrared Anomaly before Pakistan $M_S7.8$ Earthquake, October 8, 2005[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(2): 137-140.
- [5] Qiang Z J, Xu X D, Dian C G. Impending-earthquake Satellite Thermal Infrared and Ground Temperature Increase Anomalies[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36: 1894-1900.
- [6] 邓志辉,王煜,陈梅花,等.中国大陆几次强地震活动的卫星热红外异常分析[J].地震地质,2003,25(2):327-337.
Deng Z H, Wang Y, Chen M H, et al. Satellite Infrared Anomaly of Several Strong Earthquakes in China Mainland[J]. Seismology and Geology, 2003, 25(2): 327-337.
- [7] Tronin A A, Hayakawa M, Molchanov O A. Thermal IR Satellite Data Application for Earthquake Research in Japan and China[J]. Journal of Geodynamics, 2002, 33: 519-534.
- [8] 张元生,郭晓,张小美,等.应用静止卫星热红外遥感亮温资料反演地表温度的方法研究[J].西北地震学报,2004,26:113-117.
Zhang Y S, Guo X, Zhang X M, et al. Study on the Inversion Method of Land Surface Temperature by Applying IR bright Temperature Data of still Satellite[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26: 113-117.
- [9] 张景廉,杜乐天,曹正林,等.再论汶川大地震与深部气体的关系[J].西北地震学报,2011,33(1):96-101.
Zhang J L, Du L T, Cao Z L, et al. A Comparative Analysis on Evolution of Earth-gas System between Wenchuan Earthquake and Yushu Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1): 96-101.
- [10] 徐秀登,徐向民,马升灯,等.临震大气增温异常成因的初步认识[J].地震学报,1995,17(1):123-127.
Xu X D, Xu X M, Ma S D, et al. Primal Knowledge Why Atmosphere Temperature Increases before Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(1): 123-127.
- [11] 强祖基,马蔼乃,曾佐勋,等.卫星热红外地震短临预测方法研究[J].地学前沿,2010,17(5):254-256.
Qiang Z J, Ma Ai N, Zeng Z X, et al. A Study of the Method of Satellite Thermal Infrared Earthquake Prediction in Imminence[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 254-262.
- [12] 魏从信,张元生,惠少兴.2009年8月11日安达曼群岛

- $M_s7.5$ 地震热红外变化[J]. 地震研究, 2011, 34(2): 41-45.
- Wei C X, Zhang Y S, Hui S X. Thermal-infrared Variation of Andaman Islands $M_s7.5$ Earthquake on August 11, 2009 [J]. Journal of Seismological Research, 2011, 34(2): 41-45.
- [13] 张璇, 张元生, 魏从信, 等. 云南彝良 5.7 级地震前卫星热红外异常[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 171-176.
- Zhang X, Zhang Y S, Wei C X, et al. Thermal Infrared Anomaly before Yiliang of Yunnan $M_s5.7$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 171-176.
- [14] 强祖基, 侯常恭. 卫星热红外图像亮温异常——短临震兆[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 1998, 28: 564-573.
- Qiang Z J, Lin C G. Satellite Infrared Brightness Temperature Anomaly——Earthquake Imminent Precursor[J]. Science in China(D), 1998, 28(6): 564-573.
- [15] 马瑾, 单新建. 利用遥感技术研究断层现今活动的探索——以玛尼地震前后断层相互作用为例[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 210-215.
- Ma J, Shan X J. An Attempt to Study Fault Activity Using Remote Sensing Technology——A Case of the Mani Earthquake[J]. Seismology and Geology, 2003, 22(3): 210-215.
- [16] 郭卫英, 单新建, 屈春燕. 塔里木盆地红外增温现象与地震关系的初步探讨[J]. 干旱区地理, 2006, 29(5): 736-741.
- Guo W Y, Shan X J, Qv C Y. Correlation between Infrared Anomalous and Earthquakes in Tarim Basin[J]. Arid land Geography, 2006, 29(5): 736-741.
- [17] 张元生, 郭晓, 钟美娇, 等. 汶川地震卫星热红外亮温变化[J]. 科学通报, 2010, 55(3): 904-910.
- Zhang Y S, Guo X, Zhong M J, et al. Wenchuan Earthquake: Brightness Temperature Changes from Satellite Infrared Information[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(3): 904-910.
- [18] 张元生, 郭晓, 魏从信, 等. 日本 9 级和缅甸 7.2 级地震热辐射表现特征[J]. 地球物理学报, 2011, 54(10): 2575-2580.
- Zhang Y S, Guo X, Wei C X, et al. The Characteristics of Seismic Thermal Radiation of Japan $M_s9.0$ and Myanmar $M_s7.2$ Earthquake[J]. Chinese J. Geophys. 2011, 54(10): 2575-2580.
- [19] 郭晓, 张元生, 钟美娇, 等. 提取地震热异常信息的功率谱相对变化率法及震例分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2688-2695.
- Guo X, Zhang Y S, Zhong M J, et al. Variation Characteristics of OLR for the Wenchuan Earthquake[J]. Chinese J. Geophys. 2010, 53(11): 2688-2695.